

МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ СГЛАЖИВАЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Л. И. ПИЛЕЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических систем и сетей)

В настоящей статье рассмотрены дроссели стержневой конструкции, магнитопровод которых содержит распределенный по высоте стержневой магнитный зазор. Общий вид такого дросселя представлен на рис. 1. Обмотка исследуемого дросселя катушечная. Подобные конструкции дросселей широко распространены как у нас в СССР [1, 2, 3], так и за рубежом [4, 5].

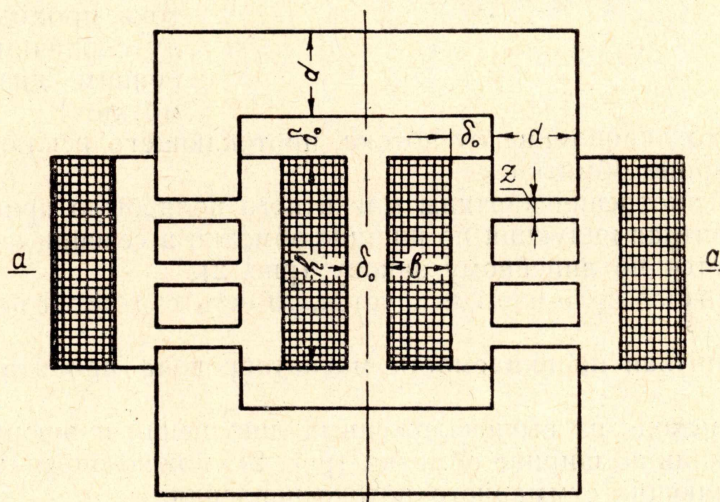


Рис. 1

При исследовании дросселей удобнее оперировать не комплексными параметрами, а некоторыми эквивалентными величинами (действующие значения тока и напряжения), вполне соответствующими электромагнитной нагрузке дросселя LI_c^2 . Чтобы применить к дросселям известные из теории трансформаторов закономерности, необходимо ввести условное понятие типовой мощности дросселя. Понятие типовой или габаритной мощности дросселя удобно тем, что по ней можно представить физические размеры (вес, габариты) и соответственно расчетные затраты на производство и эксплуатацию дросселя. Исходя из заданной

индуктивности дросселя и постоянной составляющей тока, типовую мощность дросселя S можно представить в следующем виде:

$$S = \omega L I_0 I_p, \quad (1)$$

где

- ω — частота промышленного тока;
- I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока;
- I_p — действующее значение выпрямленного тока;
- L — индуктивность дросселя, обусловленная током промышленной частоты.

Для сглаживающих дросселей согласно [1] можно принять

$$I_p = I_0. \quad (2)$$

Тогда, выражая индуктивность через потокосцепление и ток, мощность дросселя с учетом (2) примет следующий вид:

$$S = \omega \psi I_0, \quad (3)$$

где ψ — суммарное потокосцепление

$$\psi = \psi_c + \psi_\delta + \psi_v, \quad (4)$$

ψ_c — потокосцепление, обусловленное потоком, проходящим только по стержню магнитопровода;

ψ_δ — потокосцепление от потока, проходящего между сердечником и внутренним диаметром обмотки;

ψ_v — потокосцепление от потока, протекающего исключительно по ширине обмотки v .

При рассмотрении картины магнитного поля было принято:

1. Магнитная индукция по ширине обмотки в сечении $a-a$ (рис. 1) распределяется по линейному закону (рис. 2).

2. Магнитное поле идеализируется, то есть считается плоско-параллельным.

3. Магнитная проницаемость магнитопровода принята бесконечно большой.

Тогда, исходя из вышеизложенных допущений и эпюры распределения индукции по ширине обмотки (рис. 2), можно определить отдельные составляющие суммарного потокосцепления

$$\psi_c = B_z W q_z, \quad (5)$$

где q_z — расчетное сечение зазора с учетом выпучивания силовых линий

$$\psi_\delta = \pi \cdot B_{ш} \cdot W \cdot \delta_0 (d + \delta_0). \quad (6)$$

Третья составляющая ψ_v является интегральной суммой сцеплений потока, протекающего по ширине обмотки с ее витками.

Закон изменения индукции по ширине обмотки можно выразить в следующем виде:

$$B_x = \frac{B_{ш}}{b} \left(\frac{d + 2\delta_0 + 2b}{2} - x \right). \quad (7)$$

Магнитный поток элементарной трубки $d\Phi_x$, созданный бесконечно тонким слоем обмотки, расположенным на расстоянии x от оси обмотки, равен:

$$d\Phi_x = B_x \cdot 2\pi x dx. \quad (8)$$

Этот поток $d\Phi_x$ сцепляется со всеми витками, расположенными к наружному диаметру обмотки от элементарной трубки, то есть с числом витков

$$\frac{W}{b} \left(\frac{d + 2\delta_0 + 2b}{2} - x \right).$$

Тогда полное потокоцепление по ширине обмотки равно

$$\psi_s = \frac{2\pi B_m W}{b^2} \int_{\frac{d}{2} + \delta_0}^{\frac{d}{2} + \delta_0 + b} \left(\frac{d + 2\delta_0 + 2b}{2} - x \right)^2 x dx = \pi B_m W \frac{b}{3} (d + 2\delta_0 + 0,5b). \quad (9)$$

В выражениях (5), (6), (7) и (9) B_3 — расчетная индукция в зазоре с учетом выпучивания магнитных линий

$$B_3 = \frac{\mu_0 I W q_c}{n z \kappa_c q_3}, \quad (10)$$

где

μ_0 — относительная магнитная проницаемость в зазоре сердечника;

z — длина единичного зазора;

n — число единичных зазоров;

q_c — активное сечение стали стержня;

κ_c — коэффициент заполнения сталью площади круга с диаметром d

$$q_c = \frac{\pi d^2}{4} \kappa_c; \quad (11)$$

d — диаметр стержня магнитопровода;

W — число витков обмотки.

Для определения B_m — индукции в канале между сердечником и внутренним диаметром обмотки принято, что магнитный поток, проходящий по этому каналу, а также поток, проходящий по ширине обмотки, замыкаются не по магнитопроводу, а по воздуху.

Тогда на основании закона полного тока

$$B_m = \frac{\mu_0 I W \kappa_p}{2h}, \quad (12)$$

где κ_p — коэффициент Роговского [6].

Следует отметить, что незначительная доля потока, протекающего по осевому каналу и ширине обмотки, будет замыкаться и через ярма магнитопровода. Это относится к участку обмотки, расположенному в одной плоскости с магнитопроводом. В дальнейших исследованиях этой незначительной долей потока из-за ее малой величины можно пренебречь.

Учитывая (5), (6), (7), (9), (10) и (12) и выражая ампервитки $I_0 W$ через плотность тока Δ и сечение меди обмотки q_m , мощность дросселя можно представить в виде:

$$S = \pi \omega \mu_0 \Delta^2 q_m^2 \left\{ \frac{d^2}{4nz} + \frac{\kappa_p}{6} [3\delta_0 (d + \delta_0) + b (d + 2\delta_0 + 0,5b)] \right\}. \quad (13)$$

Сечение меди с учетом переменного коэффициента заполнения проводниковым металлом

$$q_m = \frac{2hby}{(x+i)(y+\delta)}, \quad (14)$$

где x и y — соответственно радиальный и осевой размеры элементарного проводника;

i — толщина изоляции на две стороны проводника;

δ — осевое расстояние между проводниковым материалом соседних катушек, включающее ширину охлаждающего радиального канала. С учетом (14) мощность дросселя (13) является функцией семи переменных d , b , h , nz , x , y и Δ .

Если воспользоваться зависимостью между плотностью тока и удельной тепловой отдачей с поверхности обмотки, то число переменных, входящих в (13), можно сократить.

Уравнение теплового баланса катушки на один погонный сантиметр среднего витка без учета теплоотдачи с поверхности магнитопровода

$$2\varepsilon(\kappa_b b + \kappa_y y) = \rho \Delta^2 \frac{by}{x+i}, \quad (15)$$

где ε — плотность теплового потока с поверхности обмотки, $вт/см^2$; κ_b , κ_y — коэффициенты, учитывающие закрытые части поверхностей b и y изоляционными деталями;

ρ — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре $ом\ см$.

Обозначая

$$\frac{2\varepsilon\kappa_y}{\rho} = \alpha; \quad \kappa_n = \frac{\kappa_b}{\kappa_y}; \quad \kappa_n b + y = p, \quad (16)$$

плотность тока можно определить из (15).

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha p (x+i)}{by}}. \quad (17)$$

Используя (17), можно мощность дросселя в киловольтамперах выразить через основные геометрические размеры

$$S = \frac{Kbh^2xyP}{(x+i)(y+\delta)^2} \left\{ \frac{d^2}{4nz} + \frac{\kappa_p}{h} [3\delta_0(d+\delta_0) + b(d+2\delta_0+0,5b)] \right\}, \quad (18)$$

где $K = 4\pi\mu_0\omega \cdot 10^{-3}$.

Выражение (18) является функцией шести переменных:

d , b , h , x , y и nz . С ростом d , b и h мощность неограниченно увеличивается, по переменной nz наблюдается обратная пропорциональность. При $x \gg i$ мощность дросселя практически не зависит от этой переменной. По переменной y мощность дросселя имеет максимум. Воспользовавшись условием

$$\frac{\partial S}{\partial y} = 0, \quad (19)$$

можно получить оптимальное значение y_0 , при котором достигается максимум мощности. Решение (19) дает

$$y_0 = \frac{\kappa_n b \delta}{\kappa_n b - 2\delta}. \quad (20)$$

Характер изменения мощности в зависимости от осевого размера проводника y представлен на рис. 3, где за 100% принята мощность дросселя при $y = y_0$.

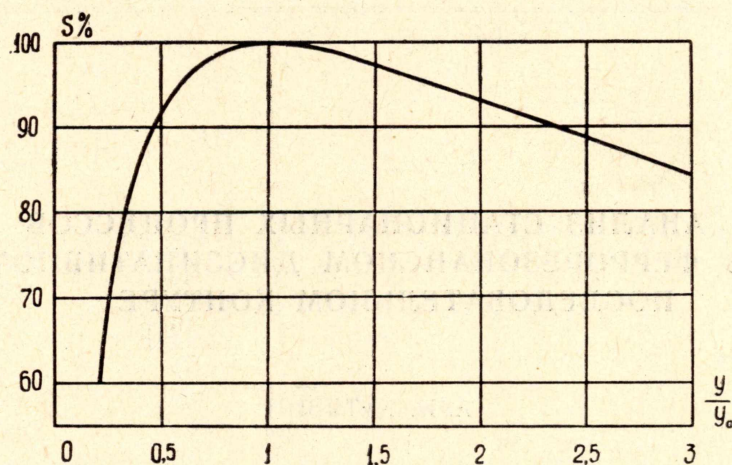


Рис. 3

Для определения других переменных d , b и h необходимо использовать дополнительные ограничения: а) ограничения веса дросселя, б) ограничение габаритов дросселя.

Вывод

Наблюдается максимум мощности сглаживающего дросселя стержневой конструкции с катушечной обмоткой при определенном осевом размере проводника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. А. Манькин. Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами. «Электричество», 1959, № 7.
2. Ю. Г. Толстов. Расчет конструктивных параметров сглаживающих дросселей для автономных инверторов тока. Расчеты режимов электрических цепей с нелинейными элементами. «Наука», 1967.
3. Б. Н. Тихменев. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. Трансжелдориздат, 1956.
4. Leuven julien van. Optimale Abmessungen von Glättungsdrosseln, ETZ, 1966, A87, N 23.
5. A. Eglinger, N. Kury, V. Rogowsky. Transformatoren und Drosselpulen für die NGÜ. ETZ, 1968, A89, N8.
6. Г. Н. Петров. Электрические машины. Ч. 1, ГЭИ, 1956.